

# 主論文

①

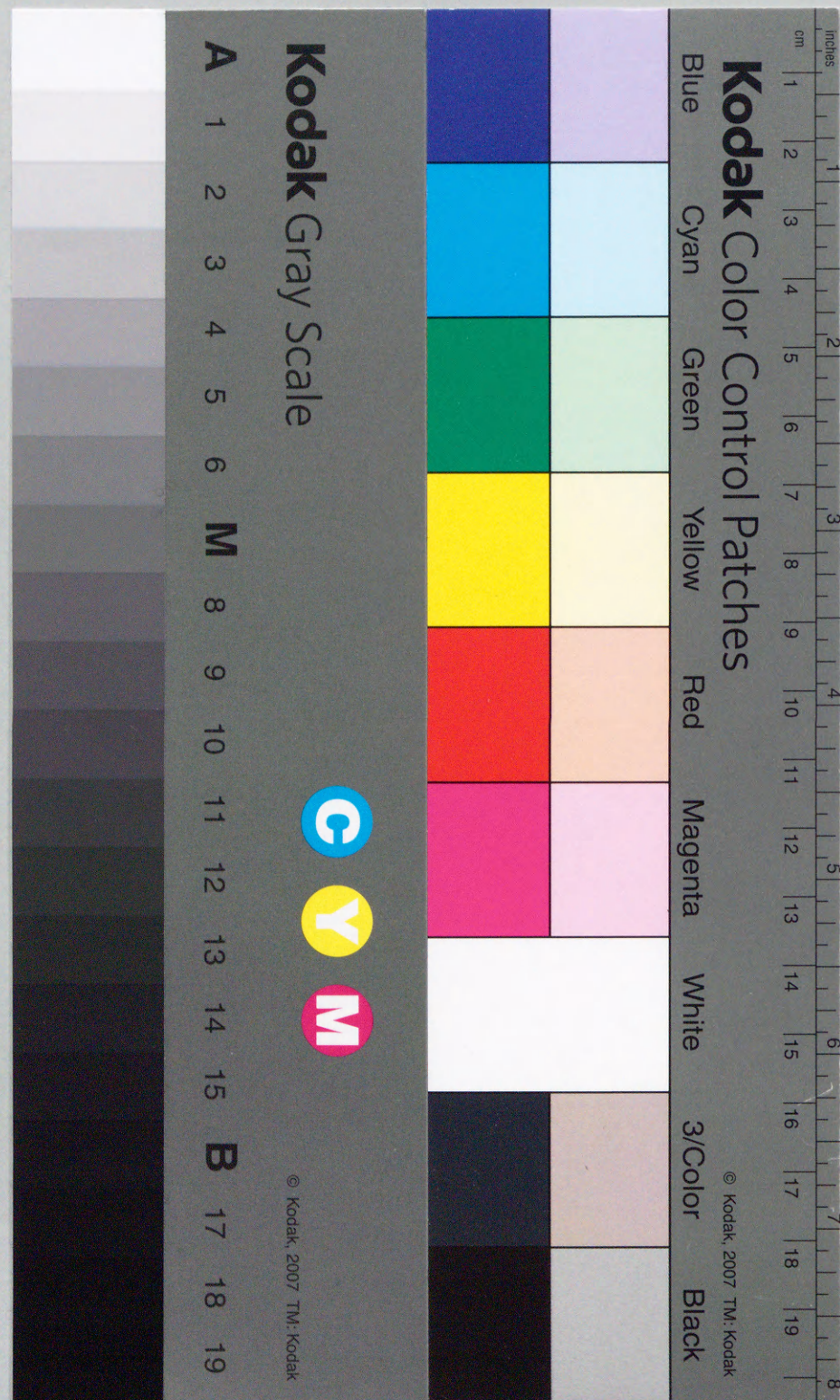
## Cybex II を用いた膝屈伸運動後の大腿筋群の変化

——MRI 及び大腿周囲径による評価——

佐藤 和 道<sup>1)</sup>

中部日本整形外科災害外科学会雑誌 第37巻 第3号 別冊

平成6年5月1日発行





原 著

## Cybex II を用いた膝屈伸運動後の大腿筋群の変化

——MRI 及び大腿周囲径による評価——

佐 藤 和 道<sup>1)</sup>

(受付:平成6年1月24日, 受理:平成6年3月16日)

## 要 約

運動後の筋肉の変化を定量的, 非侵襲的に計測することを目的として, 22人のスポーツ選手に対し Cybex II を用いて最大努力下に角速度180度/秒で膝屈伸運動50回を行なわせた後, 大腿部 MRI (T2 強調像, 水平断) を10分間隔で60分間撮影し, 大腿直筋において信号強度を測定した。また, 同様の運動の前後で大腿周囲径 (以下 COT) を膝蓋骨上 10cm において計測した。

MRI の信号強度は運動直後に最大 (増加率男性 105%, 女性88%) となり経時的に減少していったが 60分後においても運動前の値に戻らなかった。

COT は運動後 2 分から 8 分で最大 (増加量男性 13.5mm, 女性7.5mm) となり経時的に減少して約40分で運動前の値に戻った。

運動後の筋肉において MRI の信号強度が増強する理由は, 筋肉の細胞外液または細胞内液の水分量の増加によると考えられる。COT の増加も同様の機序によると思われる。

しかし, COT においては皮下脂肪の量などにより影響を受けやすい傾向がみられた。

さらに, 8 例に対し運動後の筋肉に対する冷電法 (cooling) の影響を検討した。これは同処方の運動後に大腿にアイスパックを巻いて同様の計測を行なった。MRI では約50分で, COT では約14分で運動前の値に

戻っており, cooling により運動後の筋肉の変化は短時間で運動前の状態に戻ることが示された。

本研究における MRI, COT 計測による運動後における筋肉の観察は, 筋肉の生理的反応などの研究に有用と考えられた。

## 緒 言

運動後の筋肉にはいわゆる疲労が起り, 腫脹, 硬直などの変化がみられる。この変化に対して従来様々な角度より研究が行なわれてきた。我々は運動後の筋肉の変化を非侵襲的に, かつ定量的に測定することを目的として MRI に着目した。これは1988年, Fleckenstein<sup>5)</sup>が運動後の筋肉の MRI 像において信号強度が増強することを報告したのに始まり本邦でも久野<sup>8)~11)</sup>がその意義を報告するなど近年注目を集めつつある。本研究では運動部位として大腿筋群を選び, MRI に加えて大腿周囲径 (以下 COT) を測定した。

Cybex II による一定の運動負荷後の筋肉の変化を定量的に測定し, さらにこれを応用して筋肉に対する冷電法 (cooling) の影響について検討した。

## 対 象

男性11例, 女性11例の22例の学生ボランティアを対象とした。全員大学体育会に属するスポーツ選手であり, 競技種目は陸上競技7人, サッカー6人, テニス3人, バレーボール2人, バスケットボール2人, ハ

Changes of the thigh muscles after exercise of knee joint on a Cybex — Evaluation by MRI and circumference of thigh : Kazumichi SATO (Department of Orthopaedic Surgery, Okayama University Medical School)

1) 岡山大学医学部整形外科学教室

**Key words** : Thigh, Muscles, Exercise, MRI



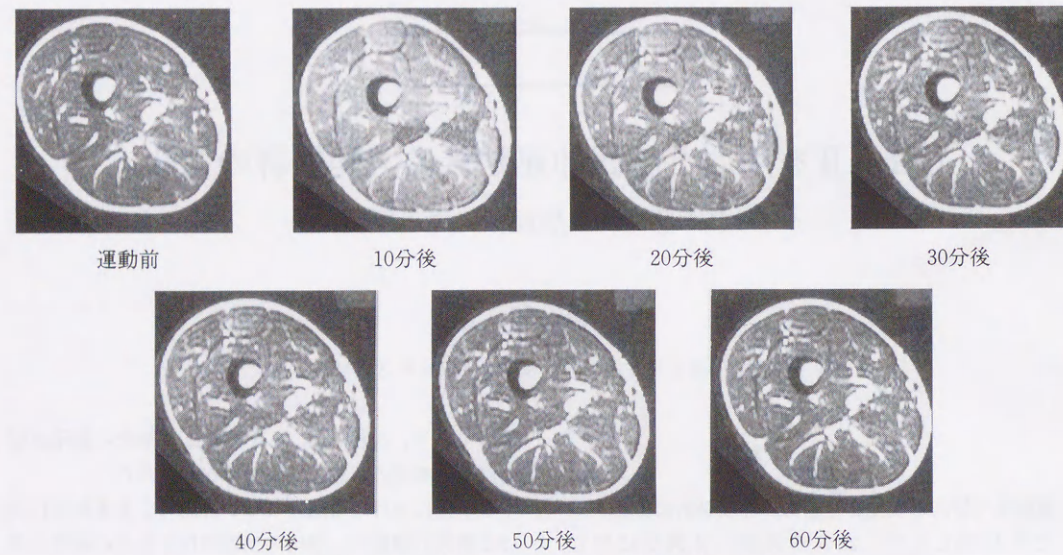


図1 20歳 男性, 運動前後の大腿部 MRI の変化

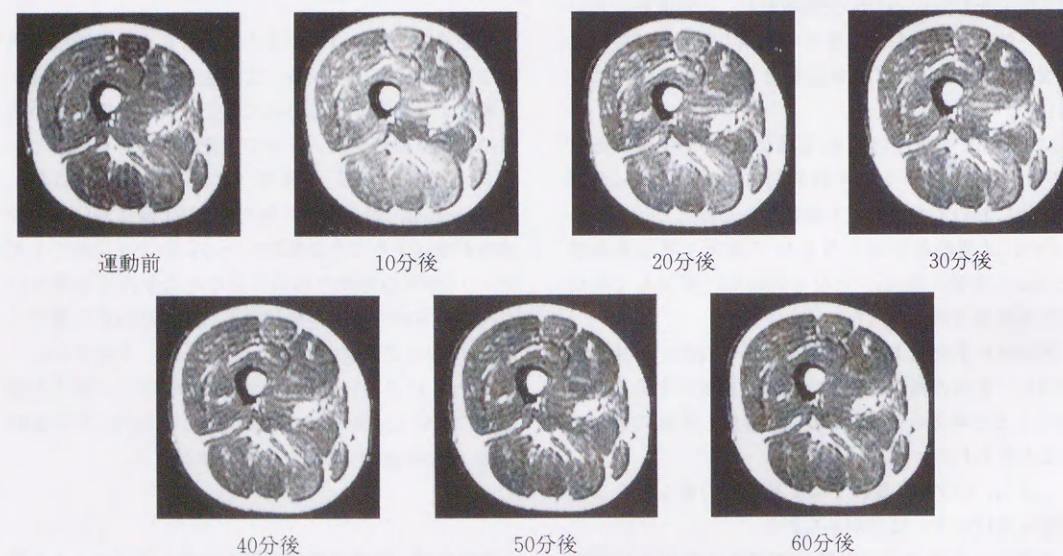


図2 20歳 女性, 運動前後の大腿部 MRI の変化

図1, 2 10分後信号強度の増強がみられ時間とともに信号強度が減少している。

ンドボール2人であった。年齢は18歳から23歳で平均20.0歳である。

## 方 法

運動負荷: Cybex を用いて右膝に対し角速度180度/秒で50回反復膝屈伸運動を最大努力下に行なわせた。

## 実験Ⅰ. MRI の変化

運動前後において, 大腿部 MRI, T2 強調像 (SE 法) を撮影した。これは膝蓋骨上 12cm における水平断で 1 回の撮影時間は約 10 分間で 6 回連続して撮影した。MRI の使用機種は Siemens 社製 Magnetom 1.5T で体幹コイルを用いた。なお, 撮影条件は,

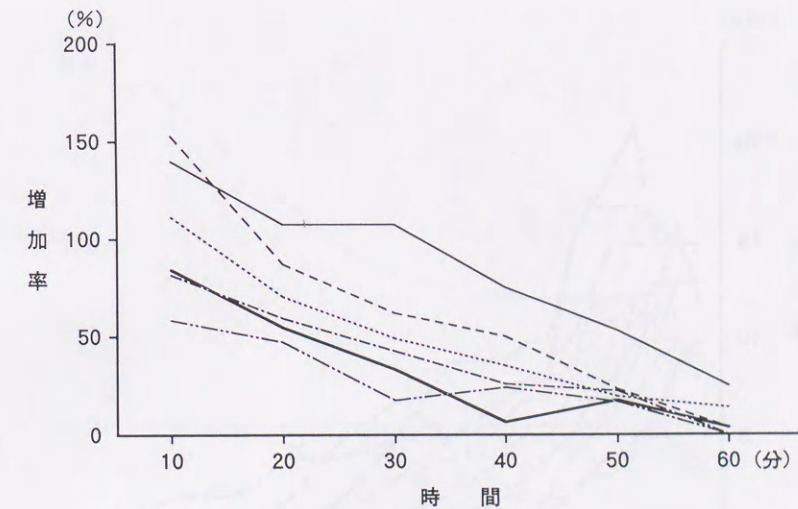


図3 MRI の信号強度の増加率 (大腿直筋) 男性

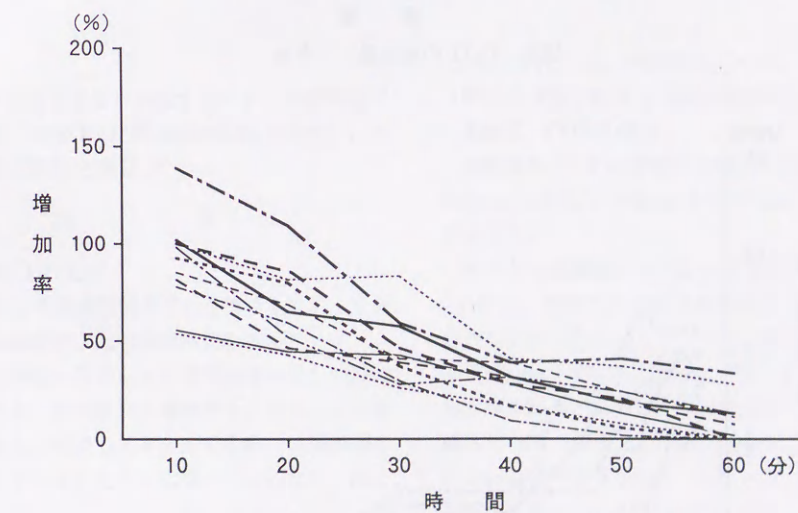


図4 MRI の信号強度の増加率 (大腿直筋) 女性

図3, 4 男女とも10分後, 信号強度の増強がみられ時間とともに減少しているが60分後でも完全には運動前の状態に戻っていない例が多い。

TR; 1800ms, TE; 90ms, 加算回数; 2 回, FOV; 400mm, matrix; 160×260, thickness; 8 mm, 撮像時間; 9 分 39 秒である。

さらに大腿直筋中央部で信号強度を測定した。この際, 大腿骨骨髓脂肪の信号強度を測定し, これで大腿直筋の信号強度を徐すことにより補正した。また, 大腿直筋の信号強度の増加率を以下の式で求めた。

増加率 = 各時間の信号強度 / 運動前の信号強度

× 100 - 100

また, 運動前後において大腿の断面積及び大腿直筋の断面積を digitizer (日立製 Tablet digitizer) を用いて計測した。

## 実験Ⅱ. COT の変化

別の日に上記運動前後で COT を膝蓋骨上 10cm において 20 分までは 2 分間隔で, それ以後は運動前の値に戻るまで 5 分間隔で測定した。測定にあたっては,



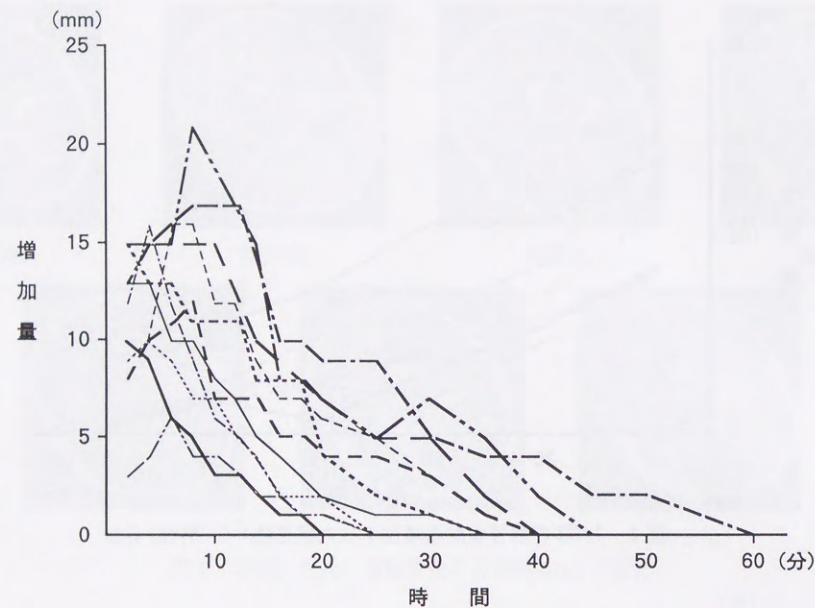


図5 COTの増加量 男性

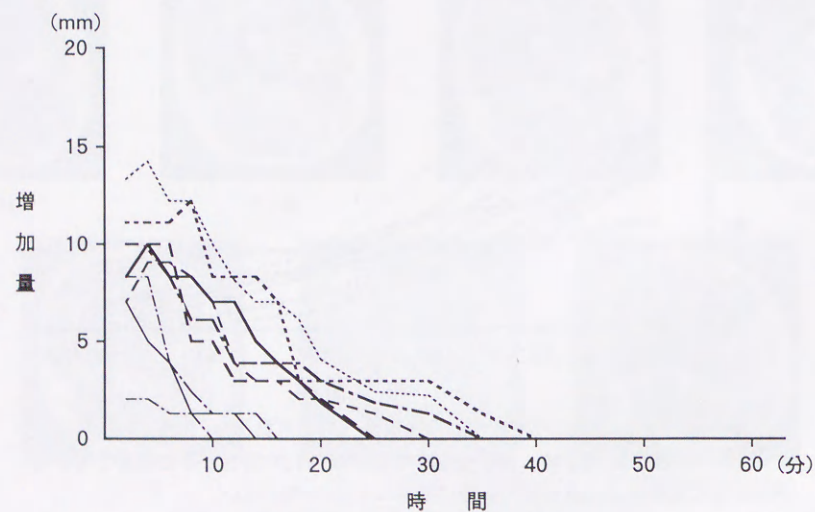


図6 COTの増加量 女性

図5, 6 男女とも運動後COTは増加しているが男性に比し女性ではその最大増加量は少ない。

運動前に測定部位に印をつけておき、同一の検者が巻尺を用い1mm単位で測定した。

#### 実験Ⅲ. Coolingの影響

22例のうちの8例(男性6例, 女性2例)に対しcooling実験を行なった。これは上記の運動直後より、

大腿四周にアイスパックを巻いて実験Ⅰ, Ⅱの計測を行なった。アイスパックは一般に理学療法で用いるホットパックを冷蔵庫で冷やし凍らせたものを用いた。アイスパックは実験途中で交換はせずCOT測定の際ははずして行なった。以下上記8例をcooling群とす

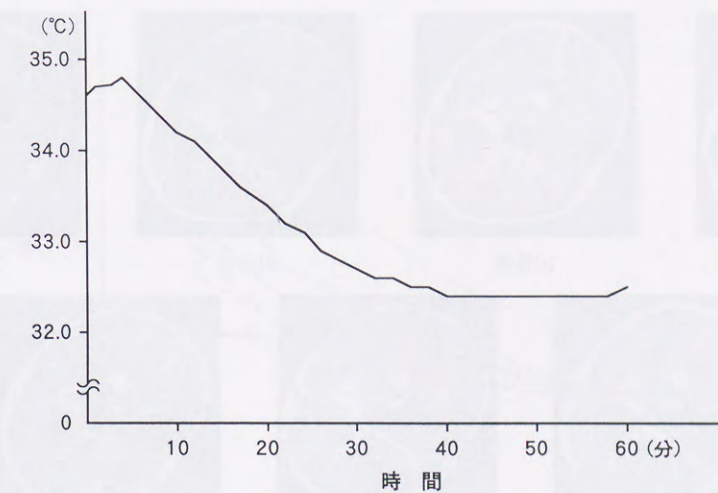


図7 35歳 男性 Coolingによる大腿直筋の温度変化(針温度計による)  
Cooling開始後7分で温度が下がり始め最大2.2度減少した。

る。

Cooling時の温度変化を測定するため、35歳男性で針深部温度計(SANEI社製Thermister)を用い、大腿直筋での温度変化を測定した。

## 結 果

### 実験Ⅰ. MRIの変化

代表的な男女の運動前後のT2強調像を示す。なお、以下、時間は運動終了後の経過時間を示す。

運動直後に伸筋、屈筋ともに信号強度の著しい増強がみられ、また、断面積でも増加がみられる。この変化は時間とともに減少してゆき、60分後には運動前の状態に近づいているが完全には戻ってはいない(図1, 2)。

なお、大腿直筋の信号強度の増加率は、男性例のうち5例はMRIの使用機種が異なるため除外し、男性6例女性11例について検討した。男性では最大増加率は58%から154%(平均105%)であった。時間的には運動直後に最大となり経時的に減少していった。しかし、60分後においても運動前の値には戻っていない(図3)。女性では最大増加率は53%から136%(平均88%)であった。時間的には男性と同様の経過であった(図4)。増加率で男女間には有意の差は認められなかった。なお、全例反対側も撮影し信号強度を測定したが変化はみられなかった。

MRI上で測定した大腿断面積は運動後に男性では

3.8%、女性では1.5%増加していた。大腿直筋のみでは男性18.4%、女性19.4%と増加していた。

### 実験Ⅱ. COTの変化

運動前のCOTは男性で420mmから495mm(平均452mm)、女性で402mmから475mm(平均443mm)であった。

男女とも運動後にCOTは有意に増加していた( $p < 0.001$ )。男性では全例運動直後より増加を認め、2分から12分で最大となっている。最大増加量は6mmから21mm(平均13.5mm)であった。その後は減少してゆき20分から60分(平均約40分)で運動前の値に戻っている(図5)。女性では最大増加量は0mmから14mm(平均7.5mm)であった。なお、2例では全く変化がみられなかった。時間的には2分から8分で最大に達し、10分から40分(平均25分)で運動前の値に戻っている(図6)。最大増加量は男性に比し女性では有意に少なかった。運動前の値に戻るまでの時間では男女間で有意の差は認められなかった。

なお、全例反対側も測定したが変化はみられなかった。

### 実験Ⅲ. Coolingの影響

Coolingにより大腿直筋の温度はアイスパックをあてて7分後より下がり始め40分後で2.2度減少している(図7)。

図1と同じ例のcooling状態でのMRI像を示す(図8)。同様に運動直後より信号強度の増強がみられ



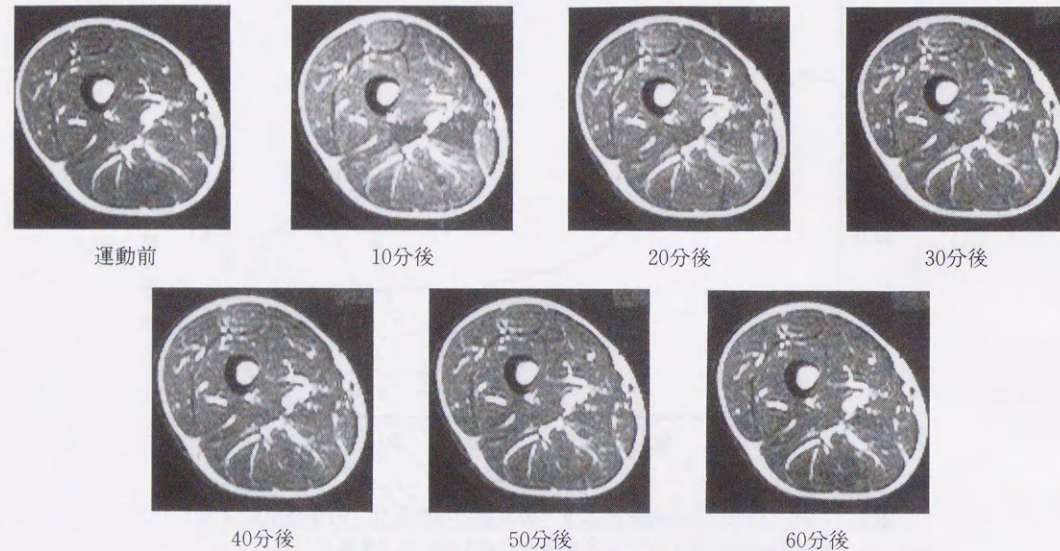


図 8 20歳 男性. Cooling 施行下の運動前後の大腿部 MRI の変化

図 1 と同一例の cooling 状態での MRI 像である. Cooling により短時間で運動前の状態に戻っている.

るが, 非 cooling 状態に比しその回復は早く50分後ではほぼ運動前の状態に戻っている.

両群の信号強度の増加率の変化を比較すると, 最大増加率は非 cooling 群で53%から154% (平均98%), cooling 群で55%から117% (平均88%) であった. 最大増加率では両群間に有意差は認められなかった. 時間的には非 cooling 群では60分後においても運動前の値に戻らない例が多いのに対し, cooling 群では50分後で戻る例もあり全体的に短時間で運動前の値に戻る傾向がみられた (図 9, 10). 次に COT の変化に関して, 非 cooling 群では最大増加量は 6 mm から 16mm (平均 11.5mm) であった. 2分から8分で最大に達し, 20分から40分 (平均30分) で運動前の値に戻った (図 11). Cooling 群では最大増加量は 3 mm から 13mm (平均9.5mm) である. 2分から6分で最大に達し, 10分から18分 (平均14分) で運動前の値に戻っている (図 12). 両群の最大増加量では有意の差はみられなかったが運動前の値に戻る時間では差が認められた.

## 考 察

MRI で運動後の筋肉の変化をとらえ得ることを初めて報告したのは Fleckenstein<sup>5)</sup>である. 彼は前腕, 下腿の運動後の MRI において信号強度が増強し T1 値, T2 値が延長することを示した.

その後 Cohen<sup>3)</sup>は下腿での運動後の MRI の変化において T2 値の変化が信号強度の増強の主要因であるとした.

Fisher<sup>4)</sup>は3段階の足関節背屈運動後の前脛骨筋の T2 値の変化より, 運動強度と T2 値の変化量に相関があるとした. また, 久野<sup>9)</sup>は日常生活の活動量の高い者とそうでない者を比較し活動量の少ない者は運動後の MRI での変化が遷延するとしている.

これまでのこうした研究から, 運動後の筋肉において T2 強調像の信号強度及び T2 値が増強すること, さらにそれが運動強度に比例することは明らかとなっているが, その理由についてはなお, 議論の余地がある. これに関して Fotadar<sup>7)</sup>は下腿三頭筋において MR Spectroscopy を用いた実験を行い, 運動後に筋肉内の水分量が増加していることを報告した. 一方, Sjogaard<sup>12)13)</sup>は <sup>3</sup>H-inulin を tracer とした筋生検による実験で中等度の運動後には筋肉の細胞外液が増加し, 最大運動後には細胞内液が増加するとした. この理由として中等度の運動においてはまず血管内の水分が筋肉の細胞外へ入り, さらに最大運動となると浸透圧の関係でこれが筋細胞内へ移行するとしている. T2 強調像が水分子含有量の多い組織において高信号となることを考えれば, 上記のごとく運動後の筋肉における信号強度の増強は筋肉内水分量が増加したものと思われる. 他方, 血流量の増加による高信号も考えられる

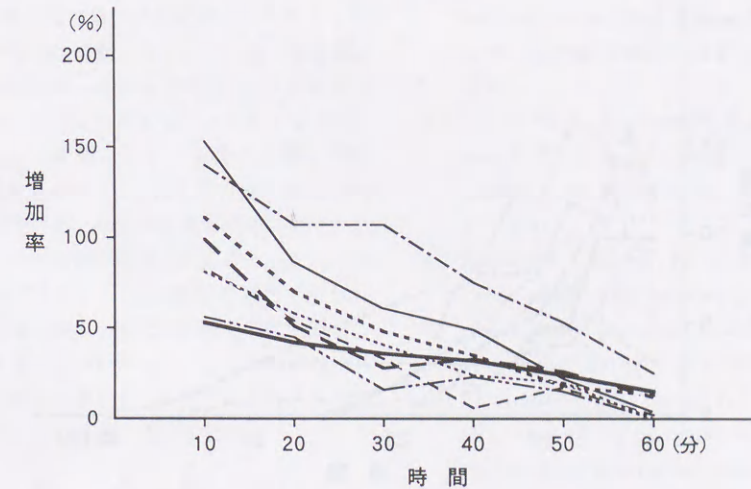


図 9 MRI の信号強度の増加率 (大腿直筋) 非 Cooling 群

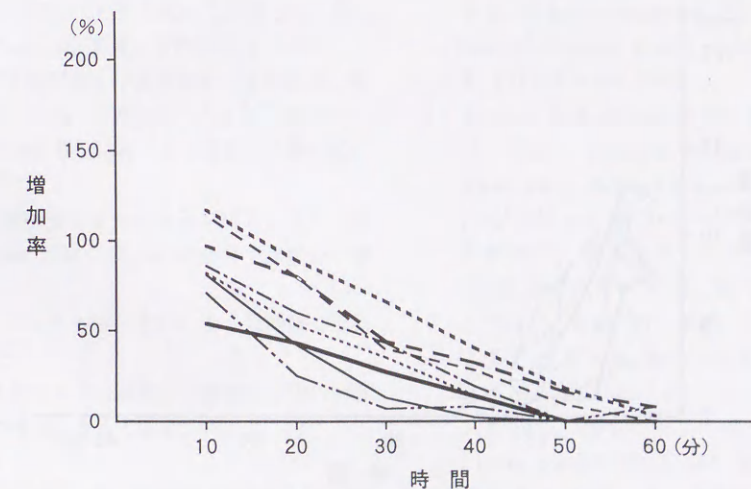


図 10 MRI の信号強度の増加率 (大腿直筋) Cooling 群

図 9, 10 非 cooling 群に比し, cooling 群では短時間で運動前の状態に戻っている.

が, Fleckenstein<sup>5)</sup>は血流を遮断して運動を行い信号強度の増強に影響がなかったことからこれを否定している. しかし, 彼は血流を再開したところさらに信号強度が増強したことを報告しており, Fisher<sup>4)</sup>も静脈血流遮断により運動後の信号強度が著しく増強したとしており, 血流は二次的に関与していると思われる.

さて, 今回の実験では Fleckenstein ら<sup>3)-6)</sup>の報告に比べ信号強度の増加率は大きく, 回復に要する時間は長かったが, これは運動量に関係していると考えられる. しかしながら, 男女にかかわらずほぼ一定の傾向が得

られたことより, 運動後の筋肉の変化を定量的に測定するのによい指標となるとと思われる.

なお, 撮像時間に関して吉岡<sup>14)</sup>は, TR を短くすることにより51秒で撮像可能であると報告しており, 本研究でも試みたが鮮明な画像は得られなかった. しかし, 今回の設定より短時間で撮像することは技術的に可能といわれており, よりリアルタイムな情報を得るためにも今後はより短時間で撮像すべきであろう.

COT に関しては, 従来より運動後に筋肉が腫大することは知られているものの, 著者の調べた範囲では



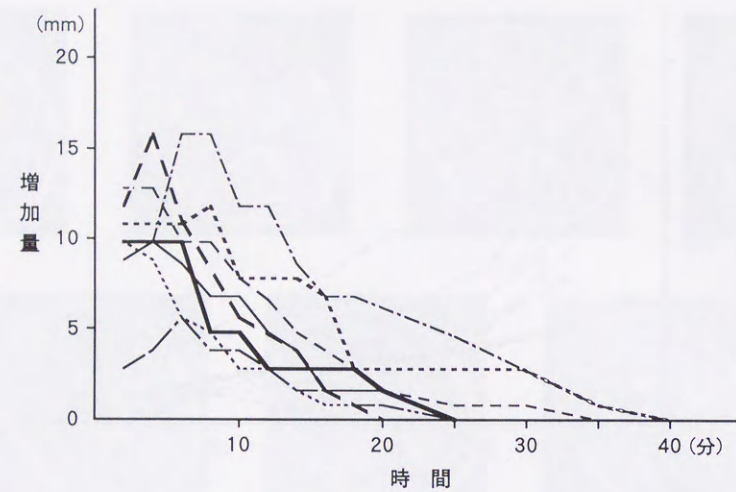


図 11 COT の増加量 非 Cooling 群

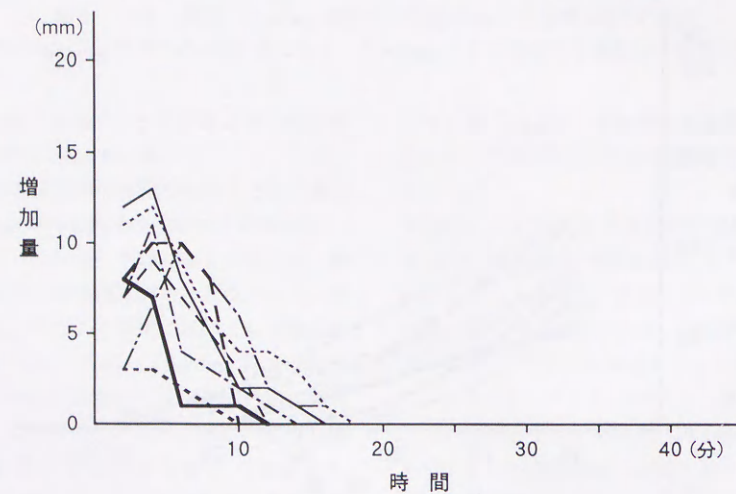


図 12 COT の増加量 Cooling 群

図 11, 12 非 cooling 群に比し, cooling 群では短時間で運動前の状態に戻っている。

運動直後の変化を計測した文献は見当らなかった。

COT が増加する原因としては、既述したごとく筋肉の水分量の増加、すなわち筋肉の浮腫、腫脹が考えられ、この意味で MRI の変化に共通するものがあると思われる。

なお、MRI では男女差は見られなかったのに対し、COT では最大増加量において女性の方が小さかった。これは女性では大腿における皮下脂肪が厚いことによる影響と考えている。今回の断面計測においても皮下脂肪の断面に占める割合は、男性13.3%に対し女

性31.6%と極めて大きかった。一方、MRI による大腿直筋の運動後断面増加率は先述した如く男性18.4%、女性19.4%と差はなかった。このように女性においても筋肉自体の腫大は起こっているものの、弾性率の違いによりそれが皮下脂肪に吸収されているものと考えられる。

今回の実験における COT の増大は、女性特に肥満者ではやや信頼性に欠けるものの運動後の筋肉の変化をみる上で測定可能な指標となると思われる。

Cooling 実験では、cooling により MRI の信号強度、

COT ともその最大増加量には変化がみられなかったが、回復までの時間は短縮されていた。最大増加量に変化のなかった理由は、cooling 開始後7、8分まではその影響が筋肉に及ばないためであると考えられる(図7)。

一般に cooling の影響として、組織の代謝を抑制し<sup>1)</sup>、血流を減少させる<sup>2)</sup>ことにより浮腫、腫脹を軽減させるとされている。今回の結果も同様の機序により運動後の変化が短時間で回復したものといえる。今回示した実験モデルは、cooling 実験を通じて示されたごとく、運動後の筋肉の変化に影響を及ぼす因子の研究に有用であることがわかった。しかしながら、本研究でとらえた変化が果たして疲労そのものと言い切れるかどうかについては更に検討を要す。

## 結 語

1. 22人のスポーツ選手に対し、膝屈伸運動後の大腿筋群の変化を MRI, COT を用いて計測した。さらに8人に対して cooling を施して計測を行なった。

2. MRI (T2 強調像) の信号強度は運動直後に最大(増加率男性105%, 女性88%)となり、経時的に減少していったが60分後においても運動前の値に戻らなかった。

3. COT は運動後2分から8分で最大に達し(増加率男性13.5mm, 女性7.5mm)約40分で運動前の値に戻った。

4. Cooling により MRI, COT とも短時間で運動前の値に戻った。

5. 今回の実験モデルは運動後の筋肉の変化に影響を及ぼす因子の研究に有用である。

本論文の要旨は第80回、第81回中部日本整形外科災害外科学会にて発表した。

稿を終えるにあたり、御指導、御高聞を賜りました井上一教授に深甚の謝意を捧げます。更に、直接御指導頂きました花川志郎講師、放射線科木本真助教授、ならびに実験に協力して下さった林正典先生、及びボランティアの学生諸君に心から感謝いたします。

## 文 献

- 1) Abramson, D. I., Kahn, A., Tuck, S. Jr. et al.: Relationship between a range of tissue temperature and local oxygen uptake in the human forearm. *J. clin. Invest.*, **37**: 1031~1038, 1958.
- 2) Barcroft, H., Edholm, O. G.: The effect of

temperature on blood flow and deep temperature in the human forearm. *J. Physiol.*, **102**: 5~20, 1943.

- 3) Cohen, M. S., Shellock, F., Kim, A. et al.: Acute muscle T2 changes during exercise. *Society of magnetic resonance in medicine abstr.*, Vol. 1, 107, 1991.
- 4) Fisher, M. J., Meyer, R. A., Adams, G. R. et al.: Direct relationship between proton T2 and exercise intensity in skeletal muscle MR imaging. *Invest. Radiol.* **25**: 480~485, 1990.
- 5) Fleckenstein, J. L., Canby, R. C., Parkey, R. W. et al.: Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. *A. J. R.*, **151**: 231~237, 1988.
- 6) Fleckenstein, J. L., Bertocci, L. A., Nunnally, R. L. et al.: Exercise-enhanced MR imaging of variations in forearm muscle anatomy and use. *A. J. R.*, **153**: 693~698, 1989.
- 7) Fotedar, L. K., Slopis, J. M., Narayana, P. A. et al.: Proton magnetic resonance of exercise-induced water changes in gastrocnemius muscle. *J. Appl. Physiol.*, **69**: 1695~1701, 1990.
- 8) 久野譜也, 秋貞雅祥: スポーツ医学における NMR. *臨床スポーツ医学*, **6**: 1129~1134, 1989.
- 9) 久野譜也, 新津 守, 阿武 泉, 他: 運動負荷による骨格筋 MR imaging の変化. *Jpn. J. Mag. Res. Med.*, 9(abstr.) 1989.
- 10) 久野譜也, 勝田 茂: スポーツ医学と NMR. *Pharm. Medica*, **10**(4): 27~31, 1992.
- 11) 久野譜也, 阿武 泉, 高橋英幸, 他: NMR (核磁気共鳴) と筋疲労. *疲労と休養の科学*, **6**: 81~86.
- 12) Sjøgaard, G., Saltin, B.: Extra-and intracellular water spaces in muscles of man at rest and with dynamic exercise. *Am. J. Physiol.*, **243**: 271~280, 1982.
- 13) Sjøgaard, G., Adams, R. P., Saltin, B.: Water and ion shifts in skeletal muscle of humans with intense dynamic knee extension. *Am. J. Physiol.*, **248**: 190~196, 1985.
- 14) 吉岡 大, 新津 守, 阿武 泉, 他: TR 短縮 MR 画像による骨格筋運動負荷の評価. *磁気誌*, **12**: 276~281, 1992.



